

УДК 621.7

В.А. Пасічник, д-р техн. наук, Київ, Україна

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Показане місце адитивних технологій (АТ) в системі сучасних процесів машинобудування. Дано тлумачення визначення АТ та класифікація основних типів. Розглянуті питання якості матеріалів, які доступні наразі на ринку матеріалів для АТ та особливості забезпечення їх фізико-механічних властивостей на різних етапах виробничого процесу. Обговорені питання складності форм деталей, що виготовляються з використанням АТ. Наголошено на важливості обґрунтованого формозмінення на базі методів топологічної оптимізації та із застосування гратчастих структур. Сформульовано «парадокс адитивних технологій» з точки зору впливу складності форми на вартість продукції. Підкреслено важливість орієнтації на нові методи проектування виробів, які б враховували можливості АТ. Визначено напрямки забезпечення ефективності застосування АТ та підкреслена незворотність їх широкого впровадження у всі сфери життя.

Ключові слова: адитивні технології, проектування виробів

Показано место аддитивных технологий (АТ) в системе современных процессов машиностроения. Дано толкование определения АТ и классификация основных типов. Рассмотрены вопросы качества материалов, которые доступны сейчас на рынке материалов для АТ и особенности обеспечения их физико-механических свойств на различных этапах производственного процесса. Обсуждены вопросы сложности форм деталей, изготавливаемых с использованием АТ. Подчеркнута важность обоснованного формоизменения на базе методов топологической оптимизации и по применению решетчатых структур. Сформулировано «парадокс аддитивных технологий» с точки зрения влияния сложности формы на стоимость продукции. Подчеркнута важность ориентации на новые методы проектирования изделий, которые бы учитывали возможности АТ. Определены направления обеспечения эффективности применения АТ и подчеркнута необратимость их широкого внедрения во все сферы жизни.

Ключевые слова: аддитивные технологии, проектирование изделий

The place of additive technologies (AT) in the system of modern processes of mechanical engineering is shown. The interpretation of the definition of AT and the classification of the main types is given. The questions of the quality of materials that are available at the market of materials for AT and features of providing of their physical and mechanical properties at different stages of the production process are considered. The questions of complexity of forms of details, which are made using AT. The importance of a substantiated form-modification on the basis of topological optimization methods and application of lattice structures is emphasized. The "paradox of additive technologies" is formulated in terms of the influence of the complexity of the form on the cost of production. It was emphasized the importance of orientation to new methods of designing products that would take into account the possibilities of AT. The directions of ensuring the effectiveness of the use of blood pressure and the irreversibility of their wide implementation in all spheres of life are emphasized.

Keywords: additive manufacturing, product design

За відносно короткий відрізок часу відбулась поява поняття і технологій швидкого прототипування (англ. *Rapid Prototyping*) та їх еволюція у адитивне виробництво (англ. *Additive Manufacturing*), тобто у той стан, коли

застосування таких технологій стає економічно вигідним і вони займають свою нішу серед конвенціональних (традиційних) технологій високотехнологічного машинобудівного виробництва [1]. Тому будемо розуміти адитивні процеси не як альтернативу, а як доповнення конвенціональних процесів, сукупність яких може і повинна застосовуватись для досягнення мети сучасного виробництва – забезпечення випуску потрібної на ринку продукції у потрібній кількості, потрібної якості з найменшими витратами.

Основні процесів машинобудівного виробництва з точки зору впливу на форму виробу можна розділи на види: **Формні**, – такі що впливають на форму деталі. До них відносяться первинні процеси отримання заготовок, вторинні процеси отримання заготовок або деталей, процеси оброблення тощо; **Нонформні**, – такі, що не впливають на форму деталі. До них відносяться процеси зміни властивостей матеріалів, формування властивостей поверхневих шарів, процеси з'єднання тощо.

Аналізуючи варіанти зміни форми у формних процесах, їх можна розділити на класи:

Дистрибутивні процеси, результатом яких є зміна початкової форми (безформної або попередньо створеної) у нову форму заготовки або готової деталі шляхом **перерозподілу (дистрибуції) матеріалу**. До такого класу відносяться процеси типів первинні процеси отримання заготовок, вторинні процеси отримання заготовок або деталей.

Субтрактивні процеси, результатом яких є зміна початкової форми заготовки у нову шляхом **видалення (субтракції) частини матеріалу** з окремих поверхонь деталі. До такого класу відносяться процеси оброблення матеріалів.

Досить довгий час у переліку основних класів виробничих процесів були відсутні **адитивні процеси**, результатом яких є зміна початкової форми (від її відсутності до попередньо сформованої) шляхом **додавання матеріалу**. Саме такі сучасні технології називають адитивними технологіями, а виробництво, яке в своїй основі називають адитивним виробництвом.

Міжнародний стандарт ASTM F2792.1549323-1 визначає адитивні технології так: *“Additive Technology — process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies”*, що в перекладі буде *“Адитивні технології — це процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів заданими тривимірних цифрових моделей, зазвичай шар над шаром, на відміну від субтрактивних технологічних процесів”*. Зазначимо, що не можна повністю погодитись з тим, що адитивні технології протиставляються субтрактивним. Мова йде про те, що **адитивні технології органічно доповнюють і розширюють спектр виробничих технологій**.

Цей стандарт виділяє 7 основних типів адитивних технологій, а саме: 1.

Material Extrusion – витискування матеріалу; 2. **Material Jetting** – розбризкування основного матеріалу; 3. **Binder Jetting** – розбризкування зв'язуючого матеріалу; 4. **Sheet Lamination** – з'єднання листових матеріалів; 5. **Vat Photopolymerization** – фотополімеризація у ванні; 6. **Powder Bed Fusion** – розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі; 7. **Directed Energy Deposition** – безпосереднє підведення енергії у місце побудови.

Суть таких технологій достатньо детально розглянута у сучасних підручниках та монографіях, наприклад у [2]. Зазначимо, що при виборі та впровадженні у виробництво будь-якого з перелічених процесів завжди постає перелік таких обов'язкових питань; 1. Доступний матеріал та його фізико-механічні властивості; 2. Що можна зробити (змінити, удосконалити) з формою деталі; 3. Яка ефективність процесу.

Практично всі типи адитивних технологій дають на вибір великий спектр матеріалів, які суттєво різняться як за фізико-механічними властивостями, так і за ціною. Якщо говорити про технології, які дозволяють створювати вироби з металів, то, наприклад, компанія *GE Additive Company*, один з лідерів у постачанні на світовий ринок обладнання та адитивних технологій роботи з металом пропонує порошки на основі, неіржавіючої сталі, жароміцної сталі, інструментальні сталі, кобальт-хромові сплави, сплави на основі нікелю, сплави титану, сплави алюмінію тощо [3]. Аналізуючи фізико-механічні властивості матеріалів слід розуміти, що вони є результатом цілого комплексу технологічних засобів як підготовки матеріалу до адитивного процесу, умов його перебігу й постоброблення. І навіть за таких умов слід розуміти, що виріб, отриманий за допомогою адитивних технологій має анізотропію фізико-механічних властивостей, аналогічно до того, як це відбувається з матеріалами при обробленні тиском. Провідні компанії, надаючи таблиці із характеристиками матеріалів дають їх стосовно обладнання, на якому вони вирощуватимуться й подаються у різних напрямках (в площині побудови, перпендикулярно або ж під кутом до площини побудови) окремими цифрами [4]. По деяких показниках різниця може бути в межах розбігу, а по деяких може сягати значень, які потребують урахування на етапі проектування виробу з урахуванням того, як він буде зорієнтований при вирощуванні. Найкращі на даний час технологічні рішення для роботи з металом, наприклад технологія селективного лазерного плавлення (англ. *SLM — Selective Lases Melting*) від компанії *GE Additive Company* гарантують високу щільність структури, відсутність пористості, зниження внутрішніх напружень за рахунок стохастичного опромінення, тобто інтегральні фізико-механічні властивості матеріалів, отриманих адитивним способом є не нижчими за такі, які гарантують процеси лиття. Проте слід розуміти й те, що відсутність сертифікату відповідності на процес для випадків деталей наукоємного машинобудування унеможливорює просту

заміну заготовки, яка отримувалась методами обробки тиском або ж литтям на високоточну заготовку, отриману адитивним процесом.

Тепер стосовно форми. Стосовно конвенціональних технологій діє правило, чим складнішою є деталь за формою, тим дорожчою вона є у виготовленні. Це пояснюється як ускладненням самого процесу, ускладненням його оптимізації і керування, здорожчанням оснастки. Саме цим пояснюється намагання розділити деталі на простіші, а відтак, і більш технологічні у виготовленні. При використанні адитивних технологій це правило не діє. Складність форми мало впливає на вартість виготовленої деталі. Більше того, якщо піти вірним шляхом свідомого ускладнення форми, застосовуючи при цьому методи топологічної оптимізації або ж вибудовуючи ґратчасту структуру матеріалу [5], ми навпаки отримаємо зменшення вартості. Один з прикладів такого підходу і його результати наведені у роботі [6]. Тому можна сформулювати *“парадокс адитивних технологій” – чим складнішою є форма деталі, тим швидше її виготовлення буде ефективним*. Взагалі питання “правильного проектування” виробів з урахуванням застосування для його виготовлення адитивних технологій потребує всебічного аналізу й широкого розгляду. Не слід очікувати ефективних рішень, намагаючись “надрукувати” деталі, які були спроектовані під верстати з ЧПК. В цьому контексті доцільно розглядати окремі питання “проектування, орієнтованого на адитивне виробництво” (англ. *DFAM - Design For Additive Manufacturing* [7]), яке є логічним розвитком “проектування, орієнтованого на складання” (англ. *DFA - Design For Assembly* [8]). При цьому можна застосовувати моделі і методи аналізу пристосованості виробу для складання [9], аналізуючи варіанти складання для різних конструкційних матеріалів [10]. Один з базових принципів методології DFA полягає у намаганні об’єднати кілька деталей в одну, після чого оцінити економічні витрати по різних варіантах на весь технологічний процес виготовлення й складання. Те саме слід робити і у випадку практичного застосування адитивних технологій. І це лише перший, найпростіший шлях. Значно більший ефект дасть застосування вже згаданих підходів, що передбачають топологічну оптимізацію конструкції або ж застосування ґранчастої мікроструктури побудови. Ще одним важливим питанням є точність і деталізація форм. На даний час для виробів машинобудування адитивні технології не забезпечують досягнення точності, яка потрібна для відповідних з’єднань деталей, проте якщо згадати про можливості об’єднання кількох деталей в одну, то частина посадочних поверхонь, за винятком рухомих з’єднань, стає не потрібною. Найкраща досяжна точність сьогодні варіюється в межах 15-50 мкм [11], при великих обсягах камер для побудови моделей 800x400x500 мм і більше [12]. Широкі можливості дають адитивні технології з точки зору ускладнення форми внутрішніх каналів. Часто такі канали або дуже складно, або взагалі неможливо виготовити із застосуванням

конвенціональних технологій. Таким чином адитивні технології в сукупності з методами цілеспрямованого ускладнення форми – це потужний інструмент в руках конструктора, який відкриває нові можливості, недосяжні раніше.

Стосовно ефективності застосування адитивних технологій, то неодноразово доводилось чути, що обладнання дуже дороге, матеріали дорогі, виготовлені деталі дуже дорогі. Хочеться зазначити, що все таке подібне вже не раз доводилось чути при появі нових технологій. Практичний досвід багатьох компаній світу свідчить [13], що вже сьогодні рішення, отримані на базі адитивних технологій є ефективними. Правильний підхід до урахування всіх складових витрат, правильний підбір технології і обладнання, застосування методології DFAM – ось запорука ефективності сучасного виробництва. Питання не є простим, адже тільки вибір адитивної технології та адитивної машини потребує урахування численних факторів, серед яких: вартість покупки комплексу; продуктивність машини; якість поверхні деталі; степінь деталізації (здатність відтворювати дрібні фрагменти); точність побудови; трудомісткість пост-оброблення; стабільність модельного матеріалу; термін служби машини до заміни основних вузлів; вартість модельних (основних й допоміжних) матеріалів; надійність й строки постачання витратних матеріалів та запасних частин; розвиненість технічної підтримки в регіоні; вартість поточного обслуговування машини; вартість сервісного контракту у постгарантійний період; надійність й довговічність машини; ресурс основних вузлів до заміни або капітального ремонту; необхідна кваліфікація персоналу, а відтак і його вартість; вимоги і витрати на облаштування й підтримку інженерної інфраструктури тощо.

Відмітимо, що суттєва економія може бути отримана шляхом суттєвого зменшення частки операцій механічного оброблення. Зменшення ваги позитивно відіб'ється на експлуатаційних властивостях виробів, для яких маса є критичною. Ускладнення оснастки для лиття підтиском шляхом додавання складних за формою внутрішніх каналів дозволить суттєво підвищити ефективність самої оснасти. Таких прикладів можна навести багато і з часом їх буде ставати все більше. Підтвердженням цього є динаміка ринку, численні дослідження і впровадження адитивних технологій у різних сферах промисловості [14].

У вже згадуваному джерелі [2] вказується, що “... *здатність обробляти матеріали адитивним способом суттєво змінить цілі галузі й дозволить виробляти нові вироби, які не можна буде виготовити із застосуванням конвенціональних технологій. Це буде тривалий і глибокий вплив на виробництво й розподілення продукту, й відтак, на суспільство в цілому*”. З цим важко не погодитись. Від себе додамо, що на високотехнологічні галузі машинобудування вплив буде не меншим, ніж вплив технологій механічного оброблення на верстатах з ЧПК, а скоріше за все — більшим. І станеться це не через 50 років. Цей процес вже розпочався, і, скоріше за все, вже протягом

найближчих 5-10 років відбудуться суттєві зміни в частині поширення й поглиблення застосування адитивних технологій у наукоємному машинобудуванні.

Список використаних джерел: 1. *Groover M.* Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4rd ed. John Wiley & Sons, 2010. – 1011 p. 2. *Gibson I.* Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer, 2015. 510 p. (DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3). 3. Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] <https://www.concept-laser.de/en/technology.html>. 4. Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_41TI-ELI.pdf. 5. Yang L. Additive Manufacturing of Metals. The Technology, Materials, Design and Production / Li Yang etc. Springer International Publishing AG 2017. 172 p. (DOI 10.1007/978-3-319-55128-9). 6. *Galjaard S.* New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. ResearchGate, September 2015, (DOI: 10.1007/978-3-319-11418-7_6). 7. *Yunlong Tang, Yaoyao Fiona Zhao,* (2016) «A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance», Rapid Prototyping Journal, Vol. 22 Issue: 3, pp.569-590 (<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>). 8. *Boothroyd G.* Product Design for Manufacture and Assembly. 3rd ed. CRC Press, 2011. 710 p. 9. *Пасічник В.А.* Бінарні відношення обмежень рухливості – основа математичного опису складальних виробів // Вісник НУ „Львівська Політехніка”. Серія „Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. Львів, Вид-во Львівської політехніки. – 2013, № 772. С. 214-220. 10. *Pasichnyk V.A., Khmurenko O.O.* Constructive-technological modeling of constructions using the system analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 4, No 7(76) (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348>). 11. Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue-Broschueren/1708_X_LINE_2000R_EN_update_2_lowres_einzel.pdf. 12. Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue-Broschueren/1708_Mlab_cusing_200R_EN_update_1_Eigendruck_X3.pdf. 13. *Badiru A.* Additive Manufacturing Handbook. Product Development for the Defense Industry. Ed. Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, David Liu. CRC Press, 2017. 931 p. 14. *André J-C.* From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing 1. John Wiley & Sons, Inc, 2017. 344 p.

Bibliography (transliterated): 1. *Groover M.* Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4rd ed. John Wiley & Sons, 2010. – 1011 p. 2. *Gibson I.* Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer, 2015. 510 p. (DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3). 3. Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] <https://www.concept-laser.de/en/technology.html>. 4. Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_41TI-

ELI.pdf. **5.** Yang L. Additive Manufacturing of Metals. The Technology, Materials, Design and Production / Li Yang etc. Springer International Publishing AG 2017. 172 p. (DOI 10.1007/978-3-319-55128-9). **6.** Galjaard S. New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. ResearchGate, September 2015, (DOI: 10.1007/978-3-319-11418-7_6). **7.** Yunlong Tang, Yaoyao Fiona Zhao, (2016) «A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance», Rapid Prototyping Journal, Vol. 22 Issue: 3, pp.569-590 (<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>). **8.** Boothroyd G. Product Design for Manufacture and Assembly. 3rd ed. CRC Press, 2011. 710 p. **9.** Pasichnyk V.A. Binarni vidnoshennja obmezhen' ruhливosti – osnova matematichnogo opisu skladal'nih virobiv // Visnik NU „L'vivs'ka Politehnika”. Serija „Optimizacija virobnychih procesiv i tehnicnij kontrol' u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni”. L'viv, Vid-vo L'vivs'koї politehniki. – 2013, № 772. S. 214-220. **10.** Pasichnyk V.A., Khmurenko O.O. Constructive-technological modeling of constructions using the system analysis. Easten-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 4, No 7(76) (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348>). **11.** Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_X_LINE_2000R_EN_update_2_lowres_einzel.pdf. **12.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_Mlab_cusing_200R_EN_update_1_Eigendruck_X3.pdf. **13.** Badiru A. Additive Manufacturing Handbook. Product Development for the Defense Industry. Ed. Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, David Liu. CRC Press, 2017. 931 p. **14.** André J-C. From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing 1. John Wiley & Sons, Inc, 2017. 344 p.

Поступила в редколлегию 25.06.2018